

ниже температуры рекристаллизации. При этом образуются прочные металлические связи в зонах непосредственного контакта поверхностей. В местах схватывания исчезает граница между соприкасающимися телами, происходит сращивание одно- и разноименных металлов.

Способы и методы борьбы со схватыванием и заеданием поверхностей при трении: 1) Наличие и исключение разрушения смазочной пленки; 2) Ограничение температуры в зоне контакта.

Фреттинг - коррозия - это процесс разрушения плотно контактирующих поверхностей пар металл-металл или металл-неметалл в результате малых колебательных относительных перемещений. Для возбуждения фреттинг-коррозии достаточны перемещения поверхностей с амплитудой 0,025 мкм. Разрушение заключается в образовании на соприкасающихся поверхностях мелких язвин и продуктов коррозии в виде налета, пятен и порошка.

Способы и методы борьбы с фреттинг - коррозией: 1) Покрытие деталей защитой от окисления; 2) Снижение перемещений ниже амплитуды 0,025 мкм; 3) Применение демпфирующих устройств; 4) Создание постоянного натяга в соединениях; 5) Наличие смазочных паров в среде соприкосновения деталей машин.

Кавитационное изнашивание происходит в потоке жидкости, движущейся с переменной скоростью в закрытом канале, в участках сильно пониженного давления, например, при обтекании препятствий, когда возникают при некоторых условиях местные разрывы сплошности с образованием каверн. Попадая с потоком в область более высокого давления, каверны захлопываются и, если это происходит у поверхности детали, жидкость с большой скоростью ударяется в стенку. Многократные повторные удары жидкости по одному и тому же участку металла (каверны возникают и захлопываются периодически, иногда с большой частотой) приводят через некоторое время к его местному разрушению, образованию углублений.

Способы и методы борьбы с кавитационным изнашиванием: 1) Проектируя гидромеханическую систему так, чтобы во всех точках потока давление не опускалось ниже давления парообразования; 2) Исключить влияния звуковых и ультразвуковых колебаний.

В последнее время в теории износа получили развитие представления о процессе водородного износа, диспергировании, выкрашивании новых образованных структур. Это связано с развитием методов исследований, с появлением новых материалов, режимов работы и возможности изучать структуры и процессы протекающие вплоть до атомного уровня. Дальнейшее развитие науки докажет многие теоретические аспекты и гипотезы протекания процесса износа, но существенных изменений в классификации или расширении теории износа ожидать трудно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаркунов Д.Н. – Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин. Смоленск 204 с. ил. 2. <http://www.mexanik.ru/399/vved.htm>. 3. <http://www.interum.ru/solutions/smaz/smazki/1>. 4. <http://engine.aviaport.ru/issues/03/page24.htm>. 5. http://www.nntu.scinnov.ru/RUS/fakyl/VECH/metod/posobie/s3_13.htm

УДК 621.01

Авсиевич А.М., Булгак Т.И., Николаев В.А., Реут Л.Е., Адаменко Д.В.

ОСОБЕННОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ ПАР РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ В МАШИННОМ АГРЕГАТЕ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Введение. В трибологии принято, что интенсивность изнашивания рабочих поверхностей пар трения определяется величиной контактного давления p , относительной скоростью скольжения в сопряжении V и характеризуется зависимостью I/l

$$I = k \cdot p^m \cdot V^n, \quad (1)$$

где k , m и n – эмпирические числовые коэффициенты.

При этом базовой моделью для проведения расчетов на износ является вращательная пара «вал – втулка» или поступательная пара с контактом взаимодействующих поверхностей по плоскости. Для повышения точности расчетов и адекватности результатов испытаний особое внимание уделяется состоянию взаимодействующих поверхностей (шероховатость, вид смазки и т.д.), а также механике их контактного взаимодействия /2/.

Ряд исследователей говорят о зависимости процесса изнашивания от более широкого спектра факторов. В трибофатике учитывается влияние на напряженное состояние изнашиваемого поверхностного слоя усталостных процессов и напряженного состояния детали в целом /3/. В работах /4/ представлены модели для расчета величины износа сопряжений с учетом их кинематики, влияния граничного и эластогидродинамического смазочного слоя, теплофизического состояния трибоконтакта, адсорбционных и диффузионных явлений, модификации трущихся поверхностей. Авторы /5,6/ доказали неравномерность распределения износа по поверхности реальных пар трения и предлагают положить в основу определения эпюр износа конструктивные особенности трибосопряжений и динамику машинного агрегата, объединяющего в себе двигатель, передаточный и исполнительный механизмы. Это позволяет учесть особенности силового взаимодействия, относительных перемещений, а также конструктивные особенности отдельных звеньев и пар трения. Наличие данных особенностей учитывается в практике других школ трибологии при разработке современных методик и устройств для экспериментального исследования износостойкости.

Применение указанного подхода позволяет с повышенной точностью определить значения физических величин, входящих в формулу (1) и непосредственно определяющих интенсивность изнашивания. Более того, результаты современных исследований /1/ говорят о том, что формула (1) справедлива только при постоянном распределении сил в контакте, что в реальных условиях практически не наблюдается. Вместо контактного давления p необходимо определять напряжение на рассматриваемом участке поверхностного слоя σ и учитывать изменение напряженного состояния во времени. Относительная скорость скольжения V определяет время существования единичной фрикционной связи и скорость деформации материала. Она влияет на тепловыделение и реологические свойства в контакте и, в конечном счете, на напряженное состояние. Колебания ее значений на разных участках трущихся поверхностей особенно существенны для рычажных механизмов. Поэтому без учета кинематики пары трения и динамики нагружения отдельных ее участков невозможно усовершенствовать прогнозирование износа реальных машин и механизмов.

Постановка задачи исследований. К факторам износа, изменение которых можно описать точными математическими зависимостями, относятся динамика внешних сил, относительные перемещения и скорости, погрешности размеров и формы контактирующих поверхностей. Их распределение по поверхности трения помимо напряженного состояния оказывает влияние на процессы в зонах фактического контакта: мощность тепловыделения, упругие и прочностные свойства материалов, вид деформаций, фрикционные свойства сопряжения, возможность протекания химических процессов и фазовых превращений в поверхностных слоях. Исходя из этого, задачей проводимых исследований является анализ влияния на процесс изнашивания кинематики относительных перемещений и динамики нагружения звеньев машин, обусловленных функционированием пары трения в машинном агрегате. Выявление соответствующих закономерностей позволит повысить точность расчета факторов износа и интенсивности изнашивания. Практическая значимость ожидаемых результатов заключается в усовершенствовании методики испытаний, разработке эффективных упрочняющих технологий и рекомендаций по оптимизации конструкции пар трения.

Анализ динамической нагруженности вращательной пары трения. Функционирование вращательной пары в рычажном механизме обуславливает существенные особенности кинематики относительного перемещения звеньев по сравнению с абстрактным сопряжением «вал – втулка». Реакция между звеньями определяется при стандартном динамическом анализе как равнодействующая внешних сил, сил тяжести G_i и инерционных нагрузок F_{i1} , M_{i1} (рис 1).

В общем случае внешние силы и инерционные нагрузки переменны по величине и направлению, звено 2 постоянно изменяет свое направление – все эти факторы обуславливают перемен-

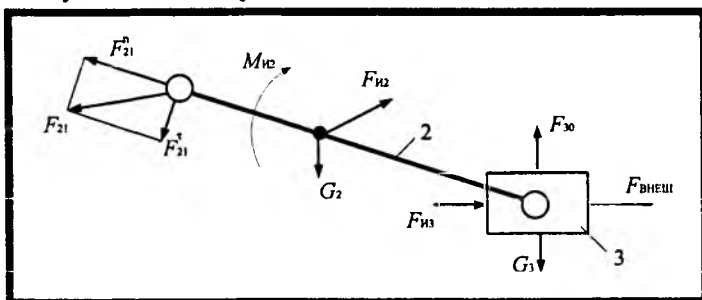


Рис. 1. Схема сил структурной группы кривошипно-ползунного механизма

ность величины и направления результирующей внешних сил, приложенных к звену 2

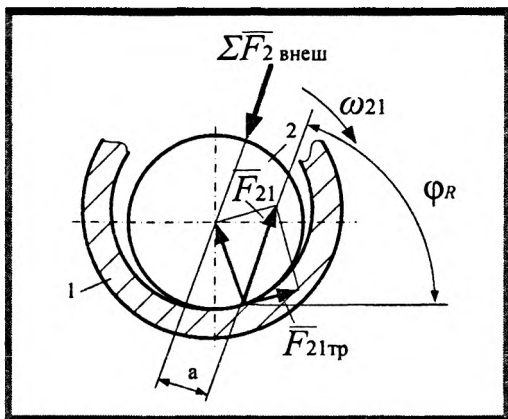


Рис. 2. Схема сил во вращательной паре

$\Sigma \bar{F}_{2 \text{ ВНЕШ}}$. Это приводит к изменению величины реакции F_{21} между шатуном и кривошипом и ее направления, описываемого в неподвижной системе координат углом φ_R (рис. 2). В результате имеет место обкатывание вала 2 по внутренней поверхности втулки 1. Аналогичные явления имеют место во всех вращательных парах любых рычажных механизмов. Как известно [7], при учете трения реакция во вращательной паре смещена относительно оси на величину

$$\vec{v} = r \cdot f$$

где r – радиус пары трения,

f – коэффициент трения между материалами вала и втулки.

Однако, такое смещение является практически постоянным, и изменение угла φ_R определяется действи-

ем внешних сил.

Таким образом, во вращательных парах рычажных механизмов кинематика относительно движения звеньев помимо относительной скорости скольжения ω_{21} должна описываться скоростью поворота угла вектора реакции.

В неподвижной системе координат скорость вращения вектора реакции $\omega_R = d\varphi_R / dt$ определяется аналитически дифференцированием уравнений

$$\varphi_R = \arccos \frac{F_{21}^x}{F_{21}} \text{ и } \varphi_R = \arcsin \frac{F_{21}^y}{F_{21}},$$

где F_{21} , F_{21}^x , F_{21}^y – соответственно реакция между звеньями 1 и 2 и ее проекции на координатные оси, определяемые аналитическим методом динамического анализа. Расчет производят для заданного закона изменения внешних сил после исследования динамики машинного агрегата и определения закона движения начального звена. В результате получают зависимости как скорости обкатывания ω_R , так и соотношение $\omega_R / \omega_1 = i_R$ – аналог скорости. Расчеты, проведенные с помощью ЭВМ для различных режимов работы кривошипно-ползунного механизма, показали, что вид зависимости скорости обкатывания от угла поворота начального звена $\omega_R(\varphi_1)$ определяется соотношением внешних сил, сил тяжести и инерционных нагрузок.

Например, для быстроходных механизмов без учета действия внешних сил график $\omega_R(\varphi_1)$ в паре кривошип-шатун имеет вид, представленный на рис. 3. Средняя скорость вращения кривошипа принималась равной 100 рад/с. Следует отметить сложный характер зависимости, примерно двукратное соотношение максимума ω_{Rmax} / ω_1 , противоположность направлений относительной скорости скольжения и скорости обкатывания, что сказывается на времени существования единичной фрикционной связи в контакте.

Вопрос о степени влияния на процесс изнашивания скорости поворота реакции во вращательной паре требует дополнительного анализа и проверки экспериментальными исследованиями. Возможность точного математического описания данного фактора создает предпосылки для создания учитывающих его способов и устройств для испытаний на сопротивление изнашиванию.

Напряженное состояние во вращательной паре трения. Как было указано выше, напряжения в поверхностных слоях деталей пар трения являются наиболее существенным фактором, определяющим износостойкость. Они определяются решением контактной задачи сжатия двух

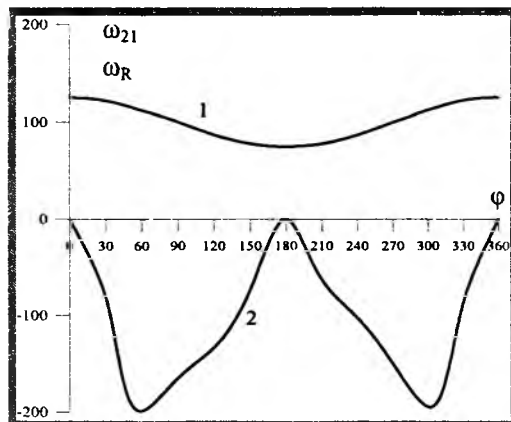


Рис. 3. Зависимость скоростных факторов износа во вращательной паре «кривошип – шатун» от угла поворота кривошипа:

1 – относительная угловая скорость ω_{21} ;

2 – скорость поворота вектора реакции ω_R

цилиндров с параллельными образующими, один из которых имеет выпуклую, а второй – вогнутую поверхность. При взаимном нажатии цилиндров силой F возникает распределенная нагрузка интенсивностью $q = F/l$, где l - длина цилиндров.

Тогда площадка контакта представляет собой узкий прямоугольник, ширина b которого (рис.4) определяется по формуле [8]

$$b = 2,15 \sqrt{q \frac{1/E_1 + 1/E_2}{1/R_1 - 1/R_2}},$$

где E_1 и E_2 , R_1 и R_2 – соответственно модули Юнга и радиусы цилиндров 1 и 2.

Наибольшее напряжение сжатия возникает в точках оси площадки контакта [8]

$$\sigma_{max} = 0,418 \sqrt{2q \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \cdot \frac{R_1 - R_2}{R_1 R_2}}.$$

Данная опасная точка расположена на глубине, равной $0,4b$.

Все главные напряжения являются напряжениями сжатия. Наибольшее касательное напряжение, которое может представлять интерес с точки зрения появления пластического течения, всегда возникает в точке в площадках, параллельных направлению главного напряжения σ_2 , т.е. параллельных оси цилиндра. Оно равно полуразности алгебраически большего главного напряжения σ_1 , и алгебраически меньшего σ_3

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = 0,3\sigma_{max}$$

Следует отметить, что переход от упругой к пластической деформации существенно изменяет механизм процесса изнашивания, поэтому определение условий ее возникновения на разных участках поверхностей трения имеет большое практическое значение.

Представленные зависимости выведены для условий статического контакта. В рассматриваемых реальных парах трения можно выделить следующие существенные для определения полей напряжений особенности: смещение точки контакта относительно оси на величину $a = r \cdot f$; наличие динамических нагрузок вплоть до возникновения ударов при скачкообразном изменении внешних сил; высокая скорость смещения зоны контакта, сопровождающееся движением фронта деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трение, износ и смазка: (Трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; Под общ. ред. Чичинадзе А.В. - М.: Машиностроение, 2003. – 575 с.
2. Кравчук А.С., Чигарев А.В. Механика контактного взаимодействия тел с круглыми границами. – Мн.: Технопринт, 2000. – 196 с.
3. Основные идеи трибофатики и их изучение в техническом университете: пособие / В.И. Сенько, Л.А. Сосновский. – Гомель: УО «БелГУТ», 2005. – 191 с.
4. Дроздов Ю.Н., Мудряк В.И., Дынгу С.И. Обобщенные характеристики для прогнозирования изнашивания трущихся поверхностей // Трение и износ. 1997, Т.18, № 6. – С. 715 - 721.
5. Патент РФ. RU 2107902 C1 1998.03.27. Способ повышения долговечности деталей подвижных соединений механизмов машин. Филонов И.П., Черкас А.А. 1998.03.27. Бюл. № 9.
6. Повышение долговечности трущихся элементов вращательных кинематических пар механизмов машин на основе моделирования их износа / И.П. Филонов, П.П. Анципорович, В.К. Акулич., Т.И. Булгак // Современные методы проектирования машин: Респ. межведомств. сб науч. тр. Вып. 2. / под общ. Ред. П.А. Витязя. В 7 томах. Т. 4. – Мн.: УП «Технопринт», 2004. – С. 127 – 132.
7. Теория механизмов и машин / Под ред. К.В.Фролова. – М.: Высш. шк., 1987. – 496 с.
8. Писаренко Г.С. и др. Сопротивление материалов. – Киев: Вища школа, 1979. – 693 с.

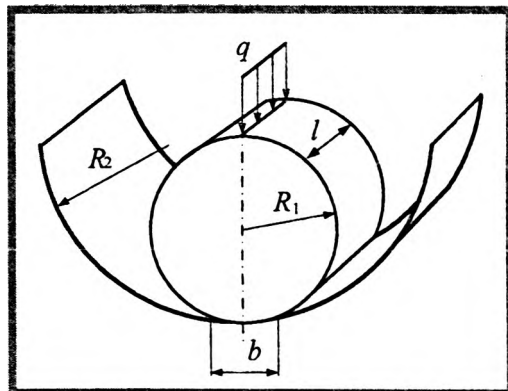


Рис. 4. Расчетная схема для определения напряжений